磁気弾性効果により磁極磁区構造を安定化した薄膜ヘッド

Thin-Film Head with Domain Structure Stabilized by the Magnetoelastic Effect

篠浦 治・小柳 勤*・中川善朗*

TDK(株)開発研究所, 千葉町市川市東大和田 2-15-7 (☎272)

*TDK(株)記録デバイス事業本部, 長野県佐久市小田井 543 (☎384-02)

O. Shinoura, T. Koyanagi,* and Y. Nakagawa*

R & D Center, TDK Corporation, 2-15-7 Higashi-Ohwada, Ichikawa, Chiba 272

*Data Storage Components Group, TDK Corporation, 543 Otai, Saku, Nagano 384-02

A new technique for creating a thin-film head with a controlled domain structure was investigated. The difference between the thermal expansion coefficients of the magnetic film and the photoresist insulation layer greatly affects the stress distribution across the upper magnetic core after annealing. Tensile stress is induced in the lower part of the upper magnetic core, and compressive stress is induced in the upper part of the core. The composition distribution of NiFe alloy across the upper core can be controlled by means of the electroplating conditions. Consequently, magnetoelastic effect anisotropy can be induced to stabilize the domain structure of the upper magnetic core. This new technique was used to fabricate a thin-film head with low wiggle noise.

Key words: thin-film head, electroplating, domain structure, cured photoresist, magnetoelastic effect anisotropy, annealing, Barkhausen noise

1. はじめに

磁気ディスク装置の高記録密度化に対応した、バルクハウゼンノイズに起因する再生ノイズの少ない出力安定性の高い薄膜ヘッドが望まれている。ヘッド磁極(磁気コア)の磁区構造が上記特性に大きな影響を及ぼすことから、特に磁気弾性効果を考慮して磁極を形成する磁性膜の磁歪および作用する応力に関して多くの研究が行われた^{1)~8)}。その結果は多くの場合、磁極磁性膜を磁歪が僅かに負となる組成とし、かつ分布のない均一組成に形成することが望ましいとされた^{9), 10)}。また層間絶縁層として使用されている熱硬化フォトレジストの変形による磁極磁区構造変化も知られていたが、実際のヘッドにおける挙動や原因は明確にはされていなかった¹¹⁾。

電気めっき法は高アスペクト比のパターニングが容易なこと、量産性に優れているなどの利点から、薄膜ヘッド磁性膜成膜に広く使用されている。しかし成膜時の電流密度により合金組成が変化するため凹凸のある上部磁極では組成分布を生じやすいのが欠点とされてきた^{9), 10)}。

本報告では金属磁性層と熱硬化フォトレジスト層の熱膨張係数が大きく異なることから、上部磁極成膜後に再び熱処理を行うことで磁極に局所的な圧縮応力が作用することに着目した。そして電気めっき法の欠点とされてきた磁極内組成分布を逆に積極的に活用する新規な磁区構造制御方法を用いた出力安定性の高い薄膜ヘッドの可能性を検討したので報告する。

2. 実験方法

磁性層にNiFe電気めっき膜、層間絶縁層としてノボラック系フォトレジスト¹²⁾を使用した薄膜ヘッド上部磁極の熱処理による磁気異方性変化を調べた。2 mm厚ガラス基板上に絶縁層パターン(フォトレジスト(5 μm厚))を形成し真空中熱処理(270°C, 1時間)を行い熱硬化した。その上に上部磁極形状の磁歪の異なるNiFe膜を磁路方向が磁化困難軸となる方向に印加された直流磁界中で電気めっき法により約2 μm成膜した。Fig. 1に示すように磁性層(a)は磁極先端部と磁極後部のバックギャップ部では基板(b)上に成膜され、磁極中間部は絶縁層(c)上に成膜されている。磁性膜成膜後に真空中磁場熱処理(250°C, 1時間)を行い前後の磁区構造を観察した。さらに実際の薄膜ヘッドでの特性把握のためにTable 1に示す諸元にてヘッド試作および評価を行った。なおウイグルノイズは再生信号の出力変動として評価した。

NiFe膜組成はEPMA(Electron Probe Micro Analyzer)を用い、膜上面または研磨加工した断面から測定した。磁区構造観察にはビッター法およびSKEM(Scanning Kerr Effect Microscope)¹³⁾を用い、膜の飽和磁歪は別途、0.1 mm厚ガラス基板上に成膜した試料を光てこ法で測定した。

3. 結果および考察

Fig. 2にビッター法による磁極パターン形状のNiFe膜の磁区構造を示す。成膜直後では磁歪値にかかわらず、いずれの場合も誘導磁気異方性により磁路方向に磁化困難軸が形成されて

Fig. 1 Top view and cross-sectional view of a core-shaped NiFe film: (a) magnetic layer; (b) substrate; (c) insulation photoresist layer.

Table 1 Head specifications and measurement conditions

Track width	6.8 μm
Gap length	0.3 μm
Coil	51 turns
Linear density	54.4 kFCI
Write current	20 mA _{pp}
Media H_c	1600 Oe

Fig. 2 Domain structure of core-shaped NiFe films: (a) 80.5 wt% Ni-Fe ($\lambda_s > 0$); (b) 81.5 wt% Ni-Fe ($\lambda_s < 0$).

おり大きな違いは見られない。これに対して熱処理後では負磁歪組成膜(B)では異方性方向が誘導磁気異方性の方向から90度回転している。逆に正磁歪組成膜(A)においては、180度磁壁の本数が増加しており、やや異方性が強くなっている。これは熱処理後では膜に圧縮応力が作用し、この応力による磁気弾性効果異方性が原因と考えられた。

上記応力の発生原因を解析するためにTable 2に示す物性値を用い、有限要素法による熱応力解析を行った^{14), 15)}。なお計算には2 mm厚のAlTiC基板、下地アルミナ層、磁極、ギャップ層、アルミナ保護膜を有する3層コイル薄膜ヘッドの2次元モデルを用いた。最初の計算により熱処理温度(250°C)においては有機物絶縁層の熱膨張係数が金属磁性層に比べて非常に大きいことから、絶縁層が大きく膨張変形することが判明した。しかし、これは単なる高温状態における熱変形に過ぎず熱処理後はすべて元の状態に戻る。そこで、高温状態に放置することで磁性層がクリープ変形または塑性変形を起こすものと仮定した。この仮定をモデル化するために高温状態での磁性層形状はそのままとし、磁性層の応力をゼロとした新規初期条件を設定した。この条件下で常温(25°C)に冷却した場合の形状、応力分布をFig. 3に示す。下部磁極と上部磁極の一部には80~200 MPa程度の引張応力が、絶縁層上の上部磁極には20~100 MPa程度の圧縮応力が生じている。このような応力分布が生じる原因は上部磁極が磁極先端部とバックギャップ部に有機物

Table 2 Physical properties of thin-film head layers

Material	Young's modulus $\times 10^{11}$ N/m ²	Poisson's ratio	Coefficient of thermal expansion $\times 10^{-7}$ K ⁻¹
Permalloy	2.0	0.30	124
Cu	1.0	0.33	165
Alumina	4.1	0.25	71
Photoresist	0.012	0.30	632
Substrate (AlTiC)	4.2	0.25	79

Fig. 3 Stress distribution and shape of the magnetic core after annealing at 250°C, with the deformation magnified 100 times.

絶縁層を介さずにギャップ層または下部磁極と密着していること、さらに基板が薄膜ヘッド素子を構成する各種の層に比べて十分に厚いためである。

一方、Fig. 4に示すように電気めっき法によるNiFe膜は成膜時の電流密度により膜組成が大きく変化する。低電流密度領域では電流密度が増加するに従い鉄含有量が増加し、ある程度以上の高電流密度領域では逆に鉄含有量が減少する。これはNiFe電気めっきが電気化学的に貴なニッケルよりも、卑な鉄が優先的に放電する変則共析と呼ばれる合金析出形態のためである^{16), 17)}。上部磁極では成膜面に凹凸があり、凸部である磁極中間部では周囲に比べて電流密度が高くなる。磁極内で均一な組成を得るためにはFig. 4の曲線の傾きが緩やかな条件で成膜を行うことが望ましい。しかし逆にこの現象を利用することで所望の組成分布を形成することができる。すなわちFig. 5に示すように上部磁極の磁極先端部とバックギャップ部では負磁歪組成、絶縁層上に形成され凸部となっている上部磁極中間部分は正磁歪組成である組成傾斜膜が成膜可能である。なお本磁性膜において磁歪組成は80.8 wt% Ni-Feであった。また上部磁極中間部分とそれ以外の部分の組成差 ΔC は成膜時の電流密度、攪拌強度または浴組成により要求値に設定できる。

Fig. 3に示す熱処理により生じる応力分布とFig. 5に示す組成分布(磁歪分布)とを組み合わせることで、磁極内において引張応力作用領域は負磁歪組成膜、圧縮応力作用領域は正磁歪組成膜とし、磁気弾性効果異方性を積極的に活用した新規な磁区構造の制御が実現する。

磁極内組成分布が異なり、かつ通常の製造プロセスおよびそれに加えて250°Cの熱処理を行ったアルミナ保護膜を有する3種類の薄膜ヘッドのSKEMによる磁区構造、電磁変換特性

Fig. 4 Relationship between the current density and the composition of an electroplated NiFe film.

を Fig. 6 に示す。磁極内を全て負磁歪組成とした従来のヘッドは、熱処理後 (B) では前述した要因実験と同様に異方性の向きが回転し、磁路方向が磁化容易軸となった。これに対して組成分布を形成したヘッド (C) では 180 度磁壁の本数が通常の製造プロセスすなわち磁極内が全て負磁歪組成合金で熱処理なしのヘッド (A) より 1 本多く、より強い異方性が付与されていることがわかる。再生ノイズの 1 つであるウイグルと呼ばれる出力変動も 1% 以下と小さな値が得られた。

異方性エネルギーと磁壁エネルギーの和が最小となる状態から磁区構造を計算し実際の磁区構造と比較することで熱処理後に上部磁極に作用している応力を計算した^{18)~20)}。なお成膜時の誘導磁気異方性 K_u-i は 140 J/m^3 、交換スティフネス定数 A は $0.9 \times 10^{-11} \text{ J/m}^2$ とした²¹⁾。Fig. 2(b) パターンの磁区構造変化から計算された応力は約 80 MPa であり、前記のシミュレーションによる応力解析値とほぼ等しい値が得られた。そしてこの応力値を用い Fig. 2(a) パターンの磁気弾性効果異方性、 $K_u-\sigma$ を求めると約 120 J/m^3 が得られた。すなわち (a) パターンにおける実質異方性は K_u-i と $K_u-\sigma$ の和である 260 J/m^3 と考えられる。

本実験に用いた形状、寸法のヘッド磁極に安定した磁区構造を形成するためには誘導磁気異方性のみでは不十分であり、Fig. 6(c) のヘッドでは磁気弾性効果異方性が付与された高い異方性が得られたことで、低ノイズ特性が実現したものと考えられる。また異方性が高くなったにもかかわらずヘッド再生出力がほとんど低下していないことから、上部磁極上部領域の透磁率変化がヘッド出力に及ぼす影響は比較的小さいものと見られる。

4. 結 論

薄膜ヘッド製造プロセスにおいて上部磁極成膜後に熱処理を行うことで有機物絶縁層の熱膨張係数が金属磁性層に比べて大きいために磁極が塑性変形を起こし、熱処理後すなわち常温では局部的に圧縮応力が生じる。シミュレーションにより下部磁極と上部磁極の一部には引張応力が、また絶縁層上の上部磁極には圧縮応力が生じることが確認された。

一方、電気めっき法による NiFe 膜が電流密度などにより膜

Fig. 5 Simplified sketch of the cross-sectional view and composition variation across the core of a three-layered-coil thin-film head. ΔC shows the composition variation between the upper and lower cores, while the dotted line shows the zero magnetostriction composition of an electroplated NiFe film.

Fig. 6 Domain structure and electromagnetic properties.

組成が変化する特性を活用することで、凸部である絶縁層上の上部磁極部は正磁歪組成、それ以外は負磁歪組成という分布が形成できる。

その結果、磁極内において引張応力作用領域は負磁歪組成膜、圧縮応力作用領域は正磁歪組成膜とすることが可能であり、磁気弾性効果異方性を利用した新規な磁区構造制御手法が

実現した。

本手法を用いた薄膜ヘッドは誘導磁気異方性に加えて磁気弾性効果異方性が付与されたことで、安定した磁区構造が形成され低再生ノイズ特性が得られた。

謝 辞 最後に本研究を行う機会を与えて頂きました弊社の齋藤俊次郎常務取締役、高山 勝取締役ならびに解析、実験、シミュレーションにご協力いただいた山本堯之氏、千原 宏氏、長 勤氏、吉田 誠氏、大森幹夫氏、上島聡史氏、佐藤雄一氏、宮内大助氏をはじめとする皆様に深く感謝いたします。

文 献

- 1) R. E. Jones, Jr.: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-15**, 1619 (1979).
- 2) 成重真治, 光岡勝也, 華園雅信, 高木政幸, 吉田敏博: 日本応用磁気学会誌, **7**, 99 (1983).
- 3) 大橋啓之, 伊藤 勝, 渡辺 真: 信学技報, MR85-11, 9 (1985).
- 4) M. Williams and S. Lambert: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-25**, 3206 (1989).
- 5) P. Kasiraj and R. D. Holmes: *J. Appl. Phys.*, **69**, 5423 (1991).
- 6) F. H. Liu, M. D. Schultz, and M. H. Kryder: *J. Appl. Phys.*, **69**, 5414 (1991).
- 7) S. H. Liao and S. E. Anderson: *J. Electrochem. Soc.*, **140**, 208 (1993).
- 8) 大橋啓之: 日本応用磁気学会研究会資料, **89-5**, 37 (1995).
- 9) M. Hanazono, S. Narishige, S. Hara, K. Mitsuoka, K. Kawakami, and Y. Sugita: *J. Appl. Phys.*, **61**, 4157 (1987).
- 10) S. H. Liao: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-26**, 328 (1990).
- 11) 斎藤美紀子, 大橋啓之, 山田一彦, 清宮健司, 小澤 隆: 日本応用磁気学会誌, **19**, 141 (1995).
- 12) L. T. Romankiw: *IBM Technical Disclosure Bulletin*, **23**, 2584 (1980).
- 13) P. Kasiraj, R. M. Shelby, J. S. Best, and D. E. Horne: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-22**, 837 (1986).
- 14) 小柳広明, 荒井礼子, 光岡勝也, 福井 宏, 成重真治, 杉田 愷: 日本応用磁気学会誌, **13**, 103 (1989).
- 15) K. Young: Proc. Symp. on Magnetic Materials, Processes, and Devices, 1990, **PV90-8**, p. 137 (Electrochem. Soc., 1990).
- 16) H. Dahms and I. M. Croll: *J. Electrochem. Soc.*, **112**, 771 (1965).
- 17) H. Deligianni and L. T. Romankiw: Proc. Symp. on Magnetic Materials, Processes, and Devices, 1990, **PV90-8**, p. 407 (Electrochem. Soc., 1990).
- 18) J. Kishigami, T. Mikazuki, and Y. Koshimoto: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-22**, 1840 (1986).
- 19) C. Saka, K. Shiiki, and K. Shinagawa: *J. Appl. Phys.*, **68**, 263 (1990).
- 20) 成重真治, 今川尊雄, 華園雅信: 日本応用磁気学会第39回研究会資料, **39-5**, 41 (1985).
- 21) M. H. Seavey and P. E. Tannenwald: *J. Appl. Phys.*, **30**, 227s (1959).

1996年10月3日受理, 1996年12月3日採録